단양지역 지하수중 자연방사성물질 우라늄과 라돈의 산출과 분포특징

조병욱¹ · 김문수² · 김태승² · 윤 욱¹ · 이병대¹ · 황재홍³ · 추창오^{4*}

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²국립환경과학원 토양지하수연구과,

³한국지질자원연구원 국토지질연구본부, ⁴경북대학교 지질학과

Characteristics of Occurrence and Distribution of Natural Radioactive Materials, Uranium and Radon in Groundwater of the Danyang Area

Byong Wook Cho¹, Moon Su Kim², Tae Seung Kim², Uk Yun¹, Byeong Dae Lee¹,
Jae Hong Hwang³, and Chang Oh Choo^{4*}

¹Groundwater Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea

²Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research, Korea

³Geological Mapping Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea

⁴Dept. of Geology, Kyungpook National University, Korea

단양지역 지하수 100개공을 대상으로 자연방사성물질인 우라늄과 라돈의 산출특징을 규명하고, 주요 성분들과의 관련성을 요인분석을 통하여 해석하였으며, 지질별 자연방사성물질의 정밀함량분포도를 작성하였다. 단양지역 지하수는 대부분 Ca-Na-HCO₃가 우세한 유형을 보여 칼슘-나트륨-중탄산형의 지하수의 특징을 가진다. 우라늄의 함량은 0.02~251.0 µg/L 범위이며, 평균 3.85 µg/L인데 미국의 음용기준치(MCL)인 30 µg/L를 초과한 지하수는 1%에 불과하다. 백악기 화강암과 선캄브리아기 변성암 지역의 지하수에서 우라늄 함량이 높게 나타나며, 퇴적암류에서는 상대적으로 낮다. 라돈 함량은 13~28,470 pCi/L 범위, 평균 2,397 pCi/L인데, 전체의 15%가 미국의 음용제한치(AMCL)인 4,000 pCi/L를 초과한다. 라돈은 백악기 화강암류 지하수에서 가장 높고, 퇴적암 지하수에서 상당히 낮다. 우라늄과 라돈은 서로 관련성이 없다. 자연방사성물질은 pH, 심도, Eh, EC 및 주요 성분들과 의미있는 상관성은 보여주지 않는다. 요인분석 결과에 의하면, 우라늄과 라돈간의 상관계수는 0.15를 보여 이들의 거동특성은 서로 관련성이 거의 없다. 그 외에 이들은 여타 수질성분과 무관하다. 다만 라돈은 SiO₂와 0.68, HCO₃와는 -0.48의 상관계수를 나타낼 뿐이다. 요인분석 결과에 의하면 특정한 요인이 자연방사성원소의 거동특성에 크게 영향을 주지 않으므로 이들은 다소 독립적인 거동특성을 보여준다. 지질에 따른 자연방사성물질 정밀함량분포도는 향후 전국적인 자연방사성물질의 분포와 지질특성에 관한 데이터베이스 구축에 유용하게 활용될 예정이다.

주요어 : 단양지역, 지하수, 우라늄, 라돈, 요인분석, 정밀함량분포도

Natural radionuclides in groundwater in the Danyang area were investigated to characterize the behaviors of uranium and radon with respect to lithology and physico-chemical components, which can aid our understanding of their occurrence, properties, and origins. To this end, a total of 100 groundwater samples were collected and analyzed, and radionuclide levels were used to construct detailed concentration maps. The water type of the groundwater, assessed using a Piper diagram, is mainly Ca-Na-HCO₃. The concentrations of uranium range from 0.02 to 251.0 µg/L (average, 3.85 µg/L) and only 1% exceed USEPA's MCL (Maximum Contaminant Level). Uranium is enriched in groundwaters of Cretaceous granites and Precambrian metamorphic rocks, whereas it is depleted in groundwaters of sedimentary rocks. The concentrations of radon range from 13 to 28,470 pCi/L (average, 2,397 pCi/L). Only 15% of the samples exceed AMCL (Alternative Maximum Contaminant Level) of 4,000 pCi/L. The radon concentration is highest in groundwater of Cretaceous granites and lowest in groundwater of sedimentary rocks. In conclusion, the distribution and occurrence of radionuclides are intimately related to the basic geological characteristics of the rocks in which the radiogenic minerals are primarily contained. The behavior of uranium is only weakly related to that of radon (correlation coefficient = 0.15). There are also weak correlations between radionuclides and the main chemical components, pH, EC, Eh, and well depth. Of note, the correlation coefficient between radon and SiO₂ is 0.68, and that between radon and HCO₃ is -0.48. Factor analysis shows that radionuclides behave somewhat independently of each other because there are no significant factors that control the behavior of chemical components as well as radionuclides. The detailed concentration maps during this study will be used to establish useful database of radionuclide distribution and geological properties throughout Korea.

Key words : Danyang area, groundwater, uranium, radon, factor analysis, detailed concentration maps

*Corresponding author: chooco@knu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

우라늄과 라돈은 암석, 토양, 지하수, 해수, 하천수 등과 같이 지권 내에서 흔하면서도 미량으로 존재하는 자연방사성물질(radionuclide)이다. 우라늄은 반감기가 매우 길기 때문에 이것의 인체위해성은 방사성 때문이라기 보다는 중금속 원소로서 가지는 화학적 독성에 기인한다. 라돈은 반감기가 3.82일에 불과하나, 무색무취의 불활성의 기체이므로 휘발성이 강하여 인체에 흡입될 경우, 흡연에 못지않게 폐암을 일으키는 주요 원인이 된다.

그 동안 국내 지하수에서 전국단위의 자연방사성물질의 함량분포 및 원인에 관한 연구는 1999년을 기점으로 한국지질자원연구원과 국립환경과학원을 중심으로 수행되어 왔다(NIER, 2000, 2002, 2006, and 2009; Cho et al., 2011). 예를 들면, 1999년~2002년 및 2006~ 2007년, 2011~2013년 현재까지 전국 규모에 걸쳐 주요 지질 시대별 및 암상별로 지하수의 자연방사성물질 함량 실태조사가 이루어져 오고 있다. 이들 조사결과에 따르면 국내 지하수의 우라늄, 라돈 함량은 우리나라와 유사한 지질환경을 가지고 있는 외국의 지하수에 비하여 상대적으로 낮으며, 화강암류 지역 지하수가 퇴적암이나 변성암지역 지하수에 비하여 자연방사성물질의 함량이 높은 것으로 나타났다(NIER, 2002, 2006, 2009; Cho et al., 2007, 2010, 2011). 이 같은 결과는 외국의 지하수 중 방사성물질에 관한 연구사례와도 일치하는 것으로서 (Lowry et al., 1987; Wathen, 1987; Cothorn and Rebers, 1990; Banks et al., 1998), 이는 산성 화성암에서 방사성광물이 상대적으로 높게 함유되는 지질학적 현상과 관련되기 때문이다.

지하수 중 우라늄과 라돈에 대한 선진국의 조사연구는 1960년대 말부터 시작되었는데, 조사지점의 개수는 미국의 경우 200,000개, 스웨덴은 35,000개 이상이다 (NIER, 2006). 해외 연구결과에 의하면 화강암지역 지하수에서 우라늄과 라돈의 함량이 높다(Betcher, 1987; Lowry et al., 1987; Wathen, 1987; Cothorn and Rebers, 1990; Banks et al., 1998). 주요 선진외국의 음용지하수 중 자연방사성물질의 관리정책은 장기간에 걸친 연구결과를 바탕으로 지속적으로 개선 및 보완을 하면서 관리하고 있다. 예를 들면, 미국은 1974년 안전한 음용수법에 규제안을 설정한 후, 30년 이상에 걸쳐 개정하였으며, 현재 우라늄 MCL은 30 $\mu\text{g/L}$, 라돈 AMCL 4,000 pCi/L 또는 MCL 300 pCi/L, 라듐-226과 라듐-228의 합을 5 pCi/L로 설정하여 관리하고 있다

(EPA, 2012). 캐나다는 우라늄의 잠정권고치를 20 $\mu\text{g/L}$ 로 설정하였다(Health Canada, 2009). 세계보건기구(WHO)는 음용수중 우라늄과 라돈의 가이드라인을 각각 15 $\mu\text{g/L}$ 과 100 Bq/L로 설정하였다(WHO, 2003, 2011).

지하수중에서 산출하는 자연방사성물질에 대한 연구는 이들의 거동특성이 지질학적으로 매우 다양할 뿐 아니라 복잡하고, 건강에 대한 위해성 평가가 중요하다. 그러므로 국내에서도 함량분포, 거동특성, 위해성, 경제성 평가 등을 고려하여 전국단위에 걸쳐서 장기간에 이루어져야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 충북 단양일대의 지하수를 대상으로 우라늄과 라돈을 비롯한 주요 성분의 산출특징과 요인 분석(factor analysis)을 통하여 우라늄과 라돈의 수리지구화학적 거동특성을 규명하였다. 또한 분석치와 시료채취 지점을 고려하여 지질별, 농도별로 구분한 다음에, 자연방사성물질의 정밀함량분포도를 작성하였다. 이는 향후 국내 지하수에서 산출되는 자연방사성물질의 수리지구화학적 거동특성 규명과 이들의 분포 데이터베이스 구축을 체계화하는 기초자료를 제공하는데 유용하게 활용될 수 있다.

지 질

단양지역의 지질은 기 보고된 지질도를 참고하여 구분하고, 암상의 특징을 기술하면 다음과 같다(Geological Survey of Korea, 1967). 동부의 선캄브리아기의 흑운모 화강암질 편마암등으로 구성된 기반암이 있으며, 이를 장산규암 및 묘봉세일층으로 구성된 양덕통과 주로 석회암으로 구성된 조선계 대석회암통이 부정합으로 피복하고 있다. 우리나라 석탄의 대부분을 생산하던 고생대의 석탄기와 폐름기 및 중생대의 트라이아스기에 해당하는 평안계의 홍점통, 사동통 및 고방산통이 그 위를 부정합으로 덮고 있다. 남서쪽 단성면 일대에는 쥐라기 퇴적암인 대동계 반송층이 분포하여, 본 지역은 고생대부터 중생대 퇴적암이 총망라하여 분포하고 있다. 이를 중생대 백악기에 흑운모 화강암 및 화강반암이 단성면과 대강면 사이에 관입하고 있으며, 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다.

고기층인 선캄브리아기의 변성암류는 흑운모화강암질 편마암류로 구성된다. 흑운모화강암질 편마암류는 본 역동부 영춘면 대강면에 분포하며 함석류석 화강암질편마암과 흑운모화강암질 편마암으로 나타난다. 함석류석화강암질 편마암은 유색광물로서 석류석, 흑운모 외에 각

섬석을 포함한다.

고생대 조선누층군 퇴적암류는 하부의 장산규암층으로부터 상부의 대석회암층에 이르는 수직적인 층서를 잘 나타내고 있다. 대체로 N45°E의 주향을 가지며 50-60°NW 경사를 가지는 등사습곡을 보인다. 장산규암층은 동반부의 선캄브리아기의 화강암질 편마암을 부정합으로 덮으며 N45°E의 주향을 가지며 주로 대상으로 산능부를 따라 분포한다. 주로 유백색규암과 석영편암으로 구성되어 있다. 회백색 또는 담회색을 띠며 조립질의 석영립과 운모류 및 활석류들이 층리에 평행하게 교호하며 현저한 편리 구조를 보인다. 대석회암층은 충식석회암과 결정질석회암, 호상석회암, 석회암 등의 분포상을 보이며 얇은 세일층을 협재한다. 흑운모화강암과의 접촉지대에서는 재결정작용으로 조립화되었으며 스카른 광물도 나타난다.

평안계는 홍점통, 사동통, 고방산통으로 구성된다. 적암색 사암 및 규회석, 석회암이 특징인 홍점통, 박층의 흑연과 탄질세일이 협재하는 사동통과 담회색 조립사암으로 구성된 고방산통으로 구성되어 있는 육상기원의 퇴적암이다.

중생대 류라기의 대동계 퇴적암류인 반송층은 도담리에서 단양읍을 거쳐 대상으로 분포하는데, 하부의 두터운 역암대와 상부의 세일과 사암의 호층대로 나뉘어진다.

중생대 백악기 화강암류는 단양지역의 서남부에 분포

하며 흑운모화강암 및 화강반암으로 구성된다. 평안계 퇴적암 및 조선계 대석회암층을 관입하고 있다. 특히 기존 암석과 접촉부근에서는 암질이 달라져 반상화강암 및 화강반암으로 나타나는 경우도 있다. 심한 열변질을 받아 사질암과 이질암들은 호온펠스화 되었으며 탄질세일은 재결정되어 결정질 석회암으로 나타난다. 구성광물은 주로 석영, 장석, 사장석, 정장석과 흑운모이 소량의 백운모가 함유되어 있다.

시료채취 및 연구방법

단양지역은 다양한 지질로 구성되나, 암상과 지질시대를 기준으로 선캄브리아기 변성암, 조선누층군, 평안계의 퇴적암, 류라기 반송층, 백악기 화강암류 등으로 세분하였으며, 이를 기준으로 지하수 시료를 채취하였다. 단양지역 지하수중 자연방사성물질의 지구화학적 특성을 파악하기 위하여 지하수공 심도, 양수량, 사용량 등의 수리지질학적 기본정보를 조사하였으며, 이와 더불어 지하수의 주요 수질항목과 자연방사성물질을 분석하였다.

단양지역의 경우 지질과 지하수공의 분포를 고려하여 가능한 한 일정거리를 유지하면서도 향후 지하수공의 보존성, 접근 용이성 등을 고려하여 100개소의 지하수공을 선정하였다. 이 지역 지하수의 대부분은 소규모 급수시설, 농업, 생활용으로 이용되고 있다.

시료채취시 현장에서 수온, 전기전도도(EC), 산화환원

Fig. 1. Piper diagram shows various groundwater types.

전위(Eh), 용존산소(DO), 중탄산(HCO_3), 탄산염이온(CO_3)을 측정하였고, 주요 양이온(Na, K, Ca, Mg, SiO_2 , B, Sr)은 ICP-AES, 주요 음이온(F, NO_3 , SO_4)은 이온크로마토그래피(IC), 우라늄은 ICP-MS를 이용하여 한국지질자원연구원에서 분석하였다. 양이온 분석용 시료는 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과한 후, 현장에서 농질산으로 pH 2를 유지시켜 채취하였다.

자연방사성물질의 경우 U, Rn을 분석하였다. 라돈은 휘발성 기체이고 쉽게 휘발되므로 라돈 분석용 시료 채취 시에는 와류에 의한 인위적인 폭기가 일어나지 않도록 하였다. 이때 채취된 8 ml의 지하수 시료는 12 ml의 설파광용액(Optiphase HiSafe3)이 포함된 22 ml의 기밀용기(vial)에 주입한 후, 밀봉하고 흔들어서 지하수시료와 설파광용액을 골고루 혼합하였다. 채취된 지하수 시료는 한국지질자원연구원에서 α 선과 β 선 분리측정이 가능한 액체설파광계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer)를 이용하여 분석하였다. PSA 준위 100에서 시료용액 8 ml에 대해 300분간 계측했을 때 검출 하한치는 3.3 pCi/L이었다(NIER, 2006). 분석된 라돈의 함량은 라돈의 반감기 3.82일을 고려하여 시료채취와 분석 시간차이에 해당하는 자연붕괴 감소율에 따라서 다시 보정하였다.

단양지역 지하수공의 심도는 30~280 m 범위이며, 평균 심도 96 m, 표준편차는 49 m로 다양하다. 본 연구에서는 주로 심부의 암반지하수를 중점적으로 조사하였으나, 자연방사성물질의 독특한 거동과 산출특성을 파악하기 위하여 천부지하수인 개인생활용, 농업용 지하수를 일부 포함시켰다.

본 연구에서는 단양지역 100개소의 수질분석치를 이용하여 요인분석(principal component or factor analysis)을 실시하였다. 요인분석은 서로 상관되는 변수들 사이의 복잡한 구조를 행렬로 나타내어 행렬의 조작을 통하여 주요 변수들 간의 변동성과 주요 인자들을 추출한다. 요인분석의 장점으로는 여러 개의 변수를 몇 개의 공통된 집단(요인)으로 묶어줌으로써 자료의 복잡성을 줄이고 몇 개의 요인은 정보를 요약하는데 이용될 수 있다. 특히 상관행렬(correlation matrix)에 의한 상관계수 및 요인분석을 위하여 SPSS v.19를 이용하였다. 이 과정에서 요인추출시 1이상의 고유값(eigenvalue)을 선택하고, Varimax 직각회전방식을 이용하였다. Varimax 직각회전방식은 각 요인(factor)에 대하여 요인적재(factor loading)의 분산을 최대화하도록 요인들을 직교변환하는 방식이다.

결과 및 고찰

수질특성

단양지역의 경우 다양한 지질로 구성되는데, 크게 5개 암상으로 구분된다. 즉 선캄브리아기 변성암, 조선누층군, 평안계 퇴적암, 류라기 퇴적암인 반송층, 백악기 화강암류로 구성된다. 이들은 각각 지질특성에 따라 고유의 수질특성을 보여준다.

단양지역 100개 지하수의 수온은 11.36~18.5°C 범위, 평균 14.1°C이다(Table 1). 천부지하수의 경우 수온은 계절과 지하수공의 심도에 영향을 받기 때문에 항상 일정하지는 않다. 조선누층군 지하수는 12.3~18.5°C, 평균은 13.9°C이다. 백악기 화강암 지하수는 12.8~16.6°C, 평균은 15.0°C이다. 선캄브리아기 변성암 지하수의 경우 12.1~15.8°C, 평균은 14.1°C이다. 류라기 반송층 및 평안계 퇴적암의 수온 범위는 각각 13.8~16.3°C, 11.3~15.6°C이다.

전체 지하수의 pH 범위는 6.0~8.4, 평균은 7.3이다. 조선누층군 지하수의 경우 7.0~7.8, 평균은 7.5로서 중성 내지 약 알칼리성이다. 백악기 화강암 지하수의 pH 범위는 6.0~7.3, 평균은 6.7이다. 이는 탄산염암질이 포함되는 조선누층군 지하수의 pH가 화강암 지하수보다 높음을 나타낸다.

전체 지하수의 전기전도도(EC)는 45~698 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 상당히 넓은데, 지하수의 산출특성에 따라서 용존 이온의 함량에 차이가 있다. EC의 평균은 331.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 중앙값(median) 366 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 낮게 나타나며, 표준편차는 166 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 이르러, 다양한 지하수가 존재하는 특성을 보인다. 조선누층군은 146~698 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위로 매우 넓으며, 평균은 426 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다. 백악기 화강암 지하수의 경우 45~175 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위, 평균은 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 낮다. 선캄브리아기 변성암 지하수의 경우 95~224 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위이고 평균은 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다.

전체 지하수의 산화환원전위(Eh)는 100~305 mV 범위이고, 평균 244 mV를 보인다. 조선누층군 지하수의 경우 167~301 mV 범위, 평균은 248 mV이다. 백악기 화강암 지하수의 경우 205~305 mV, 평균은 251 mV이다. 선캄브리아기 변성암 지하수는 100~297 mV 범위를 보인다.

전체 지하수의 용존산소(DO)는 1.3~9.7 mg/L로서 비교적 넓은 범위를 보이며, 평균은 6.7 mg/L이다. 중앙값은 7.3 mg/L, 표준편차는 2.0 mg/L로 비교적 좁은 범위에 지하수가 밀집되어 있다. 조선누층군 지하수의 경우 2.4~9.7 mg/L의 범위, 평균은 7.0 mg/L이다. 백악기 화

Table 1. Groundwater chemistry in the Danyang area. Unit is mg/L unless noted otherwise.

Sample No.	Depth (m)	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	Eh (mV)	DO	Rn 222 (pCi/L)	U (μg/L)	Gross Alpha (pCi/L)	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Sr	F	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃
Total (N = 100)																				
Maximum	280	18.5	8.38	698	305.1	74	28470.0	251.00	207.06	10.30	79.60	114.00	48.30	44.30	3.74	49.00	140.00	69.90	372.10	372
Minimum	30	11.3	6.00	45	100.0	1.32	12.7	0.02	0.00	0.16	0.66	2.56	0.09	4.49	0.01	0.77	0.04	0.92	9.15	59
Average	96	14.1	7.31	332	244.3	6.68	2396.9	3.85	5.18	1.73	5.69	44.88	13.32	13.32	0.21	6.03	18.54	17.91	169.70	229
Mean	84	14.0	7.42	366	250.9	7.26	505.0	0.65	1.25	1.23	3.52	49.35	11.75	8.90	0.10	3.82	12.40	12.60	183.50	232
Standard Dev.	49	1.3	0.43	166	37.1	2.01	5256.3	25.18	21.03	1.55	8.84	26.83	11.28	9.46	0.44	6.83	22.13	14.75	99.21	62
Chosun Group (N = 64)																				
Maximum	280	18.5	7.84	698	300.8	9.74	2370.0	10.10	207.06	10.30	23.40	114.00	48.30	39.60	1.75	0.70	49.00	140.00	69.90	372
Minimum	30	12.3	6.98	146	167.0	2.35	12.7	0.06	0.10	0.16	0.66	21.00	2.63	4.49	0.02	0.03	0.77	0.04	4.22	59
Average	100	13.9	7.46	426	248.4	7.01	443.5	1.16	6.72	2.09	3.38	60.52	19.21	8.94	0.22	0.13	7.32	22.61	22.55	229
Mean	85	13.8	7.48	424	253.0	7.42	370.0	0.57	1.65	1.65	2.38	61.00	18.90	7.17	0.11	0.09	5.19	14.40	20.15	232
Standard Dev.	54	1.1	0.18	109	30.7	1.89	355.6	1.80	26.21	1.72	3.83	17.23	10.00	6.02	0.30	0.13	7.94	23.57	15.36	62
Cretaceous Granites (N = 13)																				
Maximum	200	16.6	7.28	175	305.10	8.27	28470.0	13.70	6.80	1.55	13.30	19.80	4.10	44.30	0.08	2.96	4.69	26.00	12.00	91
Minimum	30	12.8	6.00	45	205.00	2.00	15.0	0.10	0.10	0.29	1.87	2.63	0.35	8.92	0.01	0.15	1.00	0.11	0.92	9
Average	86	15.0	6.65	95	250.74	5.67	11675.8	3.02	1.63	0.73	6.34	9.08	1.42	25.03	0.04	1.06	2.49	7.06	4.20	34
Mean	80	15.5	6.85	91	253.00	5.00	9620.0	1.91	1.10	0.56	6.49	8.64	1.00	22.00	0.03	0.99	1.76	3.01	3.38	27
Standard Dev.	41	1.5	0.45	42	38.82	2.08	9931.4	3.90	1.94	0.37	2.89	5.42	1.19	11.41	0.02	0.85	1.12	7.24	3.10	24
Precambrian Met. rocks (N = 12)																				
Maximum	100	15.8	8.00	224	297.0	8.46	12379.7	251.00	14.40	1.55	12.90	23.50	4.04	36.20	0.18	3.73	13.50	50.40	19.40	63
Minimum	36	12.1	6.48	95	100.0	1.32	410.0	0.07	0.00	0.44	5.99	8.69	0.09	13.70	0.04	0.06	1.71	0.04	1.68	30
Average	75	14.1	7.14	140	227.6	5.35	4287.5	22.09	3.37	1.02	9.51	12.82	2.11	23.56	0.08	0.86	4.44	12.18	10.25	44
Mean	75	14.3	7.14	140	237.5	4.88	2869.9	1.04	1.00	1.05	9.71	11.80	1.80	22.35	0.08	0.25	3.27	4.85	10.11	44
Standard Dev.	19	1.1	0.53	34	55.8	2.12	3915.3	75.35	4.54	0.31	2.05	4.06	1.40	6.01	0.03	1.20	3.32	16.21	4.81	10
Jurassic Bansomg Fm.(N = 6)																				
Maximum	150	16.3	8.38	392	278.1	8.36	1670.0	1.53	9.70	2.07	79.60	39.60	9.78	21.60	3.74	0.77	4.13	5.98	22.40	224
Minimum	66	13.8	6.99	110	192.0	3.94	214.8	0.17	0.70	0.33	2.02	11.20	1.36	9.61	0.14	0.10	1.90	0.04	4.28	53
Average	93	15.1	7.65	259	230.2	6.86	774.1	0.90	3.08	1.04	22.41	23.47	4.47	14.94	0.80	0.31	2.46	2.07	11.21	136
Mean	78	15.1	7.63	238	227.5	7.17	730.0	0.93	2.20	0.80	8.39	22.45	3.53	15.65	0.25	0.16	2.06	1.12	10.42	139
Standard Dev.	36	1.1	0.50	111	39.6	0.59	571.9	0.59	3.66	0.82	31.98	12.99	3.70	4.73	1.58	0.30	0.90	2.57	6.84	78
Pyeongan Group (N = 5)																				
Maximum	154	15.6	7.71	563	277.0	9.01	990.0	0.49	2.80	4.69	7.11	84.30	13.40	25.50	0.27	0.12	17.10	86.30	47.60	201
Minimum	87	11.3	6.12	47	138.0	6.89	450.0	0.02	0.20	0.44	1.53	2.56	1.05	7.30	0.01	0.04	1.93	3.99	1.19	10
Average	128	13.6	7.05	286	232.1	7.92	686.0	0.29	1.26	2.14	4.30	40.51	6.45	12.43	0.15	0.08	6.83	31.28	20.43	105
Mean	150	13.8	7.13	258	245.0	8.17	640.0	0.25	1.20	1.19	4.24	34.10	4.63	9.65	0.15	0.08	6.08	20.30	16.80	102
Standard Dev.	32	1.4	0.66	221	65.6	0.92	230.7	0.19	1.13	1.57	3.17	35.69	5.62	8.48	0.08	0.04	6.96	37.26	20.69	93

강암 지하수의 경우 2.0~8.3 mg/L, 평균은 5.7 mg/L이다.

전체 지하수의 K 함량은 0.16~10.30 mg/L로서 비교적 넓은 범위를 보이며, 평균은 1.73 mg/L이다. 조선누층군 지하수의 경우 0.16~10.30 mg/L의 범위, 평균은 2.09 mg/L를 보인다. 백악기 화강암 지하수의 경우 0.29~1.55 mg/L의 범위, 평균은 0.73 mg/L을 보인다. 선캄브리아기 변성암, 주라기 반송층 지하수의 평균 함량은 약 1 mg/L 정도이며, 평안계 퇴적암은 평균 2.14 mg/L로 약간 높게 나타난다.

전체 지하수의 Na 함량은 0.66~79.60 mg/L로서 비교적 넓은 범위를 보이며, 평균은 5.69 mg/L이다. 조선누층군 지하수의 경우 0.66~23.40 mg/L 범위, 평균은 3.38 mg/L이다. 백악기 화강암 지하수의 경우 1.87~13.30 mg/L, 평균은 6.34 mg/L이다. 선캄브리아기 변성암 지하수의 경우 5.99~12.90 mg/L의 범위, 평균 함량은 9.51 mg/L을 보인다.

전체 지하수의 Ca의 경우 2.56~114.0 mg/L의 범위이며, 평균은 44.88 mg/L이고, 조선누층군 지하수의 경우 21.0~114.0 mg/L의 범위, 평균은 60.52 mg/L이다. 백악기 화강암 지하수의 경우는 2.63~19.80 mg/L, 평균은 9.08 mg/L이다.

전체 지하수의 Mg의 함량은 0.09~48.30 mg/L, 평균은 13.32 mg/L이다. 조선누층군 지하수에서는 2.63~48.30 mg/L의 범위이며, 평균은 19.21 mg/L이다. 백악기 화강암 지하수의 경우 0.35~4.10 mg/L의 범위, 평균은 1.42 mg/L이다.

전체 지하수의 SiO₂ 함량범위는 4.49~44.30 mg/L이고 평균은 13.32 mg/L이다. 조선누층군 지하수의 함량은 4.49~39.60 mg/L의 범위이고 평균은 8.94 mg/L이다. 백악기 화강암 지하수의 경우 8.92~44.30 mg/L의 함량 범위를 보이며 평균은 25.03 mg/L이다.

전체 지하수의 Sr의 경우 0.00~3.70 mg/L의 함량범위, 평균 함량은 0.20 mg/L로서 매우 낮게 함유된다. 반송층 지하수에서 가장 높게 나타나지만, 전체적으로 미량 함유되는 성분이다.

지하수의 음이온의 경우 중탄산(HCO₃)은 9.15~372.10 mg/L로서 그 범위가 매우 넓게 나타난다. 평균 함량은 169.70 mg/L이다. 불소의 경우 함량범위는 0.01~3.74 mg/L인데 중앙값은 백악기 화강암(0.99 mg/L)과 선캄브리아기 변성암(0.86 mg/L)에서 높게 나타나고 조선누층군, 평안계퇴적암 등에서 낮게 나타난다. Cl과 SO₄의 함량은 지질 특성을 반영하는데, 대체로 퇴적암류에서 높으며 화강암지역에서 낮다. 불소는 화강암과

변성암에서 운모류에서 (OH)기를 치환하여 들어가므로 이들 분포지에서 높게 나타나며, 탄산염암이 주를 이루는 조선누층군과 퇴적암류에서 낮다. 중탄산은 용존이온들 중에서 함량이 가장 높은데, 탄산염암 지역에서 높은 것이 특징이다.

수질유형

단양지역 지하수의 수질유형을 분석하기 위하여 Piper 다이어그램에 도시하였다. 이를 위하여 주요 8대 양이온, 음이온을 당량비로 환산하고 백분율로 변환한 후에, Piper 다이어그램에 도시하였다(Fig. 1).

조선누층군 지역 지하수의 경우 대부분 Ca-HCO₃가 우세한 유형을 보인다. 백악기 화강암 지역의 지하수는 양이온은 Ca가 우세하며, Na는 넓은 범위에서 나타나며, 음이온의 경우 HCO₃이 우세하다. 따라서 대부분 Ca-Na-HCO₃ 유형을 보여준다. 선캄브리아기 변성암과 주라기 퇴적암(반송층)지역 지하수에서는 Ca와 Na가 주요 양이온으로 함유되어 수질유형은 Ca-Na-HCO₃이며, 넓은 범위에 걸쳐 나타난다.

수질성분 간의 관련성

수질특성은 pH에 따라서 쉽게 영향을 받게 된다. Fig. 2는 pH와 심도, EC, Eh, 중탄산과의 상관성을 비교한 것이다. 심도가 깊어질수록 대체로 pH는 증가함을 보여준다. 이는 심부 지하수일수록 물-암석반응이 충분히 진행되므로 수소이온이 암석, 광물에 흡착되어 가수분해 반응을 하기 때문에 pH는 증가하게 된다. EC와 중탄산은 pH가 증가할수록 비례하는, 심부로 가면서 산소와 점차 격리되는 환경이 되므로 pH가 증가할수록 Eh가 감소해야 한다. 그러나 본 지하수에서는 이러한 경향은 인지되지 않는다. 중탄산의 경우 pH에 따라서 약간 증가하는 경향성을 보인다. 그러나 일부 시료가 평균 범위를 많이 벗어나기 때문에 통계적인 의미는 부여할 수 없다.

주요 성분들 간의 상관성을 살펴보면 EC와 중탄산은 단양지역 지하수에서 가장 높은 결정계수(R²=0.83)를 보인다(Fig. 3). 이는 용존 이온들 가운데서 중탄산의 함량이 가장 높기 때문이다. 중탄산은 Ca와도 높은 정비례 관계를 보여준다(R²=0.73). 이는 가장 많은 시료수를 차지하는 조선누층군이 탄산염암으로 구성되는 지질과 관련되는 것으로 보아야 한다. 단양지하수에서는 Na와 pH는 비례관계를 보이지 않는다. 물-암석반응이 진행될수록 운모류, 각섬석류의 격자로부터 F가 빠져 나

Fig. 2. Relationships between pH and each of well depth, Eh, EC, and HCO_3^- .

Fig. 3. Relationships between HCO_3^- and each of EC and Ca, and between pH and each of Na and F.

오기 때문에 pH가 증가할수록 F함량도 증가하게 되나, 본 지역에서는 이 같은 관련성은 거의 없다(Fig. 3).

물-암석 반응이 진행함에 따라서 EC가 증가하는데 주요 성분인 SiO_2 는 pH가 높아질수록 증가하며, Ca도

SO_4 가 높아질수록 증가한다. 그러나 함량범위를 크게 벗어난 일부 시료들 때문에 전체적으로는 의미있는 상관계수를 도출하기 어렵다. 즉 일부 시료가 산점 분포하기 때문에 단순회귀식에 의한 결정계수는 낮게 나타나 비

례관계적인 의미를 부여하기 어렵다. 그럼에도 전체적인 경향은 물-암석 반응이 진행됨에 따라 용존되는 성분의 함량도 증가한다.

대부분의 지하수에서는 우라늄과 라돈의 상관관계가 낮으나 일부 지하수에서는 정의 상관관계가 있는 것으로 알려져 있으며(Asikainen and Kahlos, 1979), 노르웨이의 476개 암반 지하수의 우라늄과 라돈의 상관계수는 높은 것으로 알려져 있다(Frengstad et al., 2000). 인천지역의 경우 우라늄과 주요 성분간의 상관관계를 보면 HCO_3^- (0.71), Ca (0.69)와 비교적 높은 상관계수를 나타낸다(Cho et al., 2011). 국내의 대부분의 화강암지역 지하수의 경우 높은 탄산이나 Ca의 함량은 사장석의 용해와 관련되기도 한다(Lee et al., 1997). 그러나 국내의 경우 우라늄과 라돈의 상관성은 낮거나, 일관성이 다소 결여되어 있는데 이는 여러 요인이 복합적으로 작용하기 때문이다. 예를 들면 파쇄대의 경우 라돈의 감소가 예상되므로 우라늄과 상관성이 낮을 수 있으며, 80년대 이전에 설치한 지하수 공의 경우 불량한 케이싱으로 인해 지질에 따른 수질특성이 제대로 반영되기 어려운 점이 있다. 또한 우라늄 광화대나 우라늄 고함량인 지역은 국부적인 현상이므로 특정한 지질 전반에 걸쳐 높다고 보기 어렵다. 다만 그 동안 연구결과에 의하면 화강암질 분포지역의 지하수에서 우라늄이 높고, 퇴적암 분포지역 지하수에서 낮다는 점은 분명한 사실이다(NIER, 2000, 2002, 2006, and 2009; Cho et al., 2011). 그러므로 국내 지하수에서 우라늄과 라돈의 거동특성 규명 또는 이들 자연방사성물질과 수질성분과의 관련성을 규명하기 위해서는 여전히 장기간의 조사연구, 암질의 세분화, 광화대와 평균적인 암상구분 등이 필요하다.

우라늄 광물이 용해된 후 이동하여 지하수나 수성환경으로 운반, 침전되는 메커니즘과 화학적 거동특성은 복잡하다(Langmuir, 1978, 1997; Murphy and Shock, 1999). 그 외에도 암석내 함방사성 광물의 종류와 결정학적 특징이 중요한데, 이를 파악하는 것은 쉽지않다. 왜냐하면 우라늄광화대를 제외하면, 일반적인 암석에서 우라늄광물은 수 μm 크기의 미립질로 산출되거나, 부성분 광물에 치환되어 있어 극소량으로 포함되는데, 우라늄광물의 화학조성이 복잡하고 다양한 지질환경에서 생성되기 때문이다(Burns and Finch, 1999; Choo, 2002).

지하수의 우라늄 함량은 모암의 우라늄 함량, 지하수의 산화-환원환경과 우라늄광물의 존재형태, 지하수에 용존된 중탄산염, 불소, 인산염 등의 농도에 영향을 받으나 지하수의 라돈 함량은 지하수의 수질과 관계가 없

Fig. 4. Uranium concentrations in the Danyang area.

는 것으로 알려져 있다(STUK, 2005).

우라늄

단양지역 100개 지하수의 자연방사성물질 함량은 지질에 따라 다양한 우라늄의 함량을 보여준다(Fig. 4). 전체 지하수의 우라늄 함량은 0.02~251.0 $\mu\text{g/L}$ 범위, 평균은 3.85 $\mu\text{g/L}$, 표준편차 25.18, 중앙값은 0.65 $\mu\text{g/L}$ 로서 매우 낮다(Table 1). 이처럼 매우 낮은 중앙값이 나타나는 이유는 일부 고함량 지역의 수치가 산술적으로 큰 영향을 주기 때문인 것이다. 그러므로 한, 두 개의 고농도 지하수를 제외한다면 단양지역 대부분의 지하수에서 우라늄의 수치는 낮다고 볼 수 있다.

조사 지하수공 빈도가 높은 조선누층군 지역 지하수에서는 0.06~10.10 $\mu\text{g/L}$ 범위이고 평균은 1.16 $\mu\text{g/L}$, 표준편차는 1.80 $\mu\text{g/L}$, 중앙값은 0.57 $\mu\text{g/L}$ 이다. 이는 일부 고농도 지점의 수치가 미량함량인 대부분의 지하수와 합산한 후 산술평균 계산시에 큰 영향력을 발휘하기 때문에 나타난 결과이다. 고농도 지점을 제외하면, 대체로 일정한 범위에서 데이터가 분산된다. 10 $\mu\text{g/L}$ 이상인 곳은 1개소에 불과하다.

백악기 화강암 지역 지하수의 우라늄 함량은 0.10~13.70 $\mu\text{g/L}$ 범위, 평균은 3.02 $\mu\text{g/L}$, 표준편차 3.90 $\mu\text{g/L}$, 중앙값은 1.91 $\mu\text{g/L}$ 이다. 10 $\mu\text{g/L}$ 이상인 곳은 1

개소에 불과하다.

선캄브리아기 변성암 지역 지하수에서 우라늄의 함량은 0.07~251.00 $\mu\text{g/L}$ 범위, 평균은 22.09 $\mu\text{g/L}$, 표준편차는 75.35 $\mu\text{g/L}$, 중앙값은 1.04 $\mu\text{g/L}$ 이다. 평균함량과 표준편차가 높은 이유는 단 한 개의 시료(DY-65)에서 251.0 $\mu\text{g/L}$ 에 이르는 고농도의 지하수가 포함되어 있기 때문에 전체적인 평균이 높아진 것에 불과하다. 즉 10 $\mu\text{g/L}$ 이상인 곳은 1개소이나, 최대함량은 251.00 $\mu\text{g/L}$ 로서 단양시료 전체에서 가장 높다. 선캄브리아기 변성암지역에서 이 고함량 시료를 제외하면 우라늄의 함량은 3 $\mu\text{g/L}$ 이하로서 낮다. 한국에서만 매우 높은 것은 우라늄이 국부적으로 부화되어 있음을 보여주는 것이다. 그런데 이 초고함량 지점은 화강암지역과의 경계부에 위치하고 있어서 지하심부로 내려가게 되면 실제의 지질은 화강암일 가능성이 높다. 일반적으로 화강암의 경우 우라늄의 함량은 화강암체의 연변부에서 높게 나타난다(Cho et al., 2011). 본 선캄브리아기 변성암지역 전반에 걸쳐서 우라늄의 함량은 낮다.

쥬라기 반송층 지역 지하수의 우라늄함량은 0.17~1.53 $\mu\text{g/L}$ 범위, 평균은 0.90 $\mu\text{g/L}$ 이다. 평안계 퇴적암 지역의 지하수는 0.02~0.49 $\mu\text{g/L}$ 범위이고, 평균은 0.29 $\mu\text{g/L}$ 인데, 퇴적암 지역 지하수에서 우라늄의 함량은 매우 낮게 나타난다.

라돈

단양지역 지하수의 라돈함량은 지질에 따라서 다양한데(Fig. 5), 백악기 화강암 지하수에서 가장 높고, 그 다음으로는 선캄브리아기 변성암 지하수에서 비교적 높게 나타난다. 그 외에 퇴적암 지역 지하수에서 라돈의 함량은 상당히 낮다.

단양지역 지하수의 라돈 함량은 13~28,470 pCi/L 범위이고 평균 2,397 pCi/L, 중앙값은 505 pCi/L, 표준편차는 5,256 pCi/L로 나타난다(Table 1). 전체의 15%가 미국의 음용제한치(AMCL)인 4,000 pCi/L를 초과한다.

조사 지하수공 갯수가 가장 많은 조선누층군 지역 지하수에서는 13~2,370 pCi/L의 범위, 평균은 443 pCi/L, 표준편차는 356 pCi/L, 중앙값은 370 pCi/L이다. 미국의 음용제한치(AMCL)를 초과하는 곳은 하나도 없다.

백악기 화강암 지역 지하수에서는 15~28,470 pCi/L의 범위를 보이며, 평균은 11,676 pCi/L, 표준편차는 9,931 pCi/L, 중앙값은 9,620 pCi/L이다. 이는 단양지역의 지질 중에서 최대값과 평균값이 가장 높는데 77%가 미국의 음용 제한치(AMCL)를 초과한다. 고함량인 15,000 pCi/L

Fig. 5. Radon concentrations in the Danyang area.

L를 초과하는 곳은 38.5%에 이른다. 이러한 초과 비율은 심성암지역 249개 지하수의 초과비율인 18.1%보다 월등히 높으며(NIER, 2002), 대전지역의 83개 지하수의 23.0%(Cho et al., 2010)에 비해서도 매우 높다.

선캄브리아기 변성암 지역 지하수의 경우 410~12,380 pCi/L 범위, 평균 4,287 pCi/L, 표준편차 3,915 pCi/L, 중앙값 2,870 pCi/L이다. 41.7%가 미국의 음용 제한치(AMCL)를 초과하나 1개소를 제외하면 10,000 pCi/L 이하로서 화강암에 비하면 함량범위가 낮다.

쥬라기 반송층 퇴적암 지역 지하수는 215~1,670 pCi/L의 범위, 평균은 774 pCi/L이다. 평안계퇴적암 지역 지하수는 450~990 pCi/L, 평균은 686 pCi/L이다. 이들 퇴적암 지역 지하수는 조선누층군과 더불어 라돈의 평균 함량과 범위가 낮다.

자연방사성물질의 수리지질학적 거동특성

라돈과 우라늄간의 상관성은 조선누층군에서 약간 정비례하나, 다른 지질에서는 상관성이 거의 없다(Fig. 6). 이는 우라늄과 무관하게 라돈이 쉽게 휘발되거나 감소하기 때문인데, 대수층에 파쇄대가 발달하거나 산화전위가 쉽게 변하는 환경에 라돈이 놓여 있음을 의미한다. 우라늄과 라돈의 함량은 지하수공의 심도, Eh, pH와는 주목할 정도의 상관성을 나타내지 않는다(Fig. 7, Fig.

Fig. 6. Relationship between uranium and radon in the Danyang area.

Fig. 7. Relationships between pH and each of radon and uranium concentrations in the Danyang area.

8). 라돈은 특히 휘발성이며, 반감기가 짧기 때문에 일관성있는 상관성은 나타나기 어렵다. 이천지역의 경우에도 지하수의 라돈과 다른 성분들과의 상관계수는 ± 0.15 미만으로 매우 낮게 나타난다(Cho et al., 2011). 우라늄은 물-암석반응에 의한 성분인 불소와는 비교적 비례관계를 보이나, Sr과는 뚜렷한 관련성을 보여주지 않는다. 우라늄은 백악기 화강암류에서 특히 불소와 관련되어 있음을 나타내나, 통계적인 수준의 상관성은 없다(Fig. 9).

우라늄은 지하수에서 중탄산과 황산이온과 같은 착음이온과 결합하여 거동하는 특성이 있는데, 본 지역에서

Fig. 8. Relationships between Eh and each of radon and uranium concentrations in the Danyang area.

는 우라늄은 이들과는 어느 정도 비례관계를 보이나, 신뢰도는 낮게 나타난다(Fig. 10). 그렇지만 이러한 경향성은 특히 조선누층군에서 잘 나타난다. 조선누층군은 탄산염암이 주를 이루는데, 중탄산의 함량이 타 지질에 비하여 높은 것이 특징이다.

전체적으로 볼 때, 우라늄, 라돈과 수질성분들 간에 의미있는 상관성은 도출되지 않는다. 또한 조사지역 각 지질 그룹 내에서도 우라늄과 라돈에 대하여 주요 성분들은 0.5 이상의 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 거의 나타내지 않는다. 특히 주요 수질 성분들에 대하여 일대일로 대응하는 선형, 단순회귀식을 적용할 경우, 방사성물질과 수질성분들 간에 의미있는 상관성은 존재하지 않는다.

요인분석

따라서 본 조사에서는 요인분석에 의해서 다중성분들 간 상관성 분석을 실시하였다. 본 조사에서는 주요 성분들간의 상관계수를 구하였으며, 공통성을 추출한 다음에 요인 적재값을 구한 다음에 요인을 추출하고, 회전공간에 나타내었다.

먼저 단양지역 전체시료 100개소를 대상으로 암질과 무관하게 통계분석하여 단양지역 지하수내 주요성분들

Fig. 9. Relationships between uranium and each of F and Sr concentrations in the Danyang area.

Fig. 10. Relationships between uranium and each of HCO_3 and SO_4 concentrations in the Danyang area.

간의 상관성을 분석하였다(Table 2). 변수간의 상관관계 계산은 변수간 상관관계 행렬을 산출함으로써 이루어진

Fig. 11. Factor analysis of geochemical components in Danyang groundwater.

다. 변수간의 상호관련성을 파악하는데 이 상관관계 행렬이 요인분석의 입력자료가 된다.

단양 지하수의 설명된 총분산(total variance explained)과 적재값(loadings)은 주로 요인 1, 요인 2에 크게 의존함을 알 수 있다. 그렇지만 이들도 전체 합이 46.3%에 불과하여 영향력이 큰 특정한 요인은 없다고 볼 수 있다(Table 3).

단양 지하수의 우라늄, 라돈은 특정한 요인에 거의 무관함을 알 수 있다. 즉 요인 1, 요인 2와 거의 상관성이 없다. 요인분석 결과에 따르면 일부 수질성분은 요인 1, 요인 2와 밀접한 상관성이 있다. 라돈은 SiO_2 와 밀접한 관련성을 가지고 거동한다. Ca는 EC와 관련성이 높다. NO_3 는 Cl과 관련되므로 오염에 의한 원인으로 판단된다.

정밀함량 분포도

본 연구에서는 측정지점의 함량과 지리적 분포를 이용하여 자연방사성물질의 함량분포도를 작성하였다. 이 같은 함량분포도는 논산일대의 지하수를 대상으로 작성된 바 있다(Cho et al., 2012). 본 연구에서는 지질도를 최대한 단순화시켜 선암브리아기 변성암류, 조선누층군, 백악기 화강암류, 주라기 반송층, 평안계퇴적암 및 충적층으로 단순화시켜 분류하였다. 고려된 자연방사성물질은 라돈, 우라늄, 전알파, 라듐이었으나 전알파와 라듐 함량은 검출한계 미만의 비율이 높아서 제외시켰으며, 우라늄과 라돈의 함량분포도만 작성하였다. 자연방사성물질의 함량등급은 우리나라 지하수의 우라늄과 라돈함량 분포 정도와 외국의 제한치 등을 고려하여 우라늄은 $1 \mu\text{g/L}$ 이하, $1\sim 5 \mu\text{g/L}$, $5\sim 30 \mu\text{g/L}$, $30\sim 100 \mu\text{g/L}$, 100

Fig. 12. Uranium concentration map of the Danyang area, showing the geology and concentration levels.

Fig. 13. Radon concentration map of the Danyang area, showing the geology and concentration levels.

µg/L 이상으로 등급화하였고, 라돈은 300 pCi/L 이하, 300~1000 pCi/L, 1,000~4,000 pCi/L, 4,000~8,100 pCi/L, 8,100 pCi 이상으로 등급화하였다.

단양지역 지하수의 우라늄함량 분포도를 살펴보면, 우라늄 함량은 99%가 30 µg/L 이하의 값을 가지며, 불과

3% 만이 10 µg/L 이상 값을 가진다(Fig. 12). 30 µg/L 이상인 지점의 지질은 선캄브리아기 변성암류 지역인데, 이곳은 백악기화강암과 접하여 있어서 실제로는 하부에는 백악기 화강암일 가능성도 있다. 특히 선캄브리아기 변성암류 지역에서는 우라늄의 함량은 전체적으로 낮으

Table 2. Correlation matrix of components in the Danyang groundwater.

	pH	EC	Eh	DO	Rn	U	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Sr	F	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃
pH	1.00	0.53	-0.06	0.24	-0.5	0.04	0.14	0.17	0.47	0.37	-0.39	0.19	-0.17	0.10	0.15	0.29	0.54
EC	0.53	1.00	0.19	0.18	-0.49	-0.11	0.44	-0.07	0.94	0.80	-0.56	0.15	-0.44	0.51	0.50	0.68	0.91
Eh	-0.06	0.19	1.00	0.30	0.09	-0.07	0.09	-0.07	0.25	0.07	0.03	0.00	-0.05	0.21	0.27	0.03	0.14
DO	0.24	0.18	0.30	1.00	-0.10	0.02	-0.05	-0.05	0.22	0.07	-0.09	-0.03	-0.25	0.05	0.25	-0.14	0.17
Rn	-0.54	-0.49	0.09	-0.10	1.00	0.15	-0.23	0.10	-0.48	-0.38	0.68	-0.13	0.60	-0.16	-0.17	-0.33	-0.48
U	0.04	-0.11	-0.07	0.02	0.15	1.00	-0.08	0.09	-0.12	-0.10	0.10	-0.04	0.33	-0.05	-0.09	-0.02	-0.11
K	0.14	0.44	0.09	-0.05	-0.23	-0.08	1.00	-0.03	0.43	0.23	-0.14	0.21	-0.17	0.38	0.24	0.34	0.34
Na	0.17	-0.07	-0.07	-0.05	0.10	0.09	-0.03	1.00	-0.22	-0.29	0.20	0.21	0.17	0.21	-0.06	-0.03	-0.11
Ca	0.47	0.94	0.25	0.22	-0.48	-0.12	0.43	-0.22	1.00	0.67	-0.58	0.08	-0.45	0.54	0.53	0.64	0.85
Mg	0.37	0.80	0.07	0.07	-0.38	-0.10	0.23	-0.29	0.67	1.00	-0.44	0.07	-0.36	0.17	0.16	0.54	0.87
SiO ₂	-0.39	-0.56	0.03	-0.09	0.68	0.10	-0.14	0.20	-0.58	-0.44	1.00	-0.03	0.57	-0.13	-0.14	-0.36	-0.58
Sr	0.19	0.15	0.00	-0.03	-0.13	-0.04	0.21	0.21	0.08	0.07	-0.03	1.00	-0.09	0.05	-0.08	0.27	0.14
F	-0.17	-0.44	-0.05	-0.25	0.60	0.33	-0.17	0.17	-0.45	-0.36	0.57	-0.09	1.00	-0.17	-0.25	-0.26	-0.43
Cl	0.10	0.51	0.21	0.05	-0.16	-0.05	0.38	0.21	0.54	0.17	-0.13	0.05	-0.17	1.00	0.50	0.49	0.30
NO ₃	0.15	0.50	0.27	0.25	-0.17	-0.09	0.24	-0.06	0.53	0.16	-0.14	-0.08	-0.25	0.50	1.00	0.35	0.17
SO ₄	0.29	0.68	0.03	-0.14	-0.33	-0.02	0.34	-0.03	0.64	0.54	-0.36	0.27	-0.26	0.49	0.35	1.00	0.52
HCO ₃	0.54	0.91	0.14	0.17	-0.48	-0.11	0.34	-0.11	0.85	0.87	-0.58	0.14	-0.43	0.30	0.17	0.52	1.00

Table 3. Total variance explained and loadings.

Components	Initial eigenvalue			Extraction sums of squares loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	6.057	35.628	35.628	4.359	25.641	25.641
2	1.808	10.636	46.263	3.506	20.622	46.263
3	1.603	9.428	55.692			
4	1.309	7.702	63.394			
5	1.220	7.174	70.568			
6	1.013	5.960	76.528			
7	.800	4.704	81.232			
8	.697	4.101	85.333			
9	.627	3.685	89.018			
10	.551	3.241	92.259			
11	.374	2.198	94.458			
12	.317	1.867	96.325			
13	.275	1.617	97.942			
14	.205	1.209	99.151			
15	.125	.735	99.886			
16	.013	.078	99.964			
17	.006	.036	100.000			

* Extraction method : Principal component analysis

므로 이곳의 고농도 지역은 광화대이거나, 국부적인 현상으로 보아야 한다.

라돈 함량이 가장 높은 지역이 대강면 방곡리의 한 지점이다. 라돈 함량이 4,000 pCi/L 이상인 지역은 백악기 화강암류와 선캄브리아기 변성암류 지역에만 위치하

고 있다(Fig. 13). 라돈 함량이 가장 높은 지역은 백악기 화강암지역이며, 낮은 지역은 퇴적암 분포지역이다. 이같은 함량별 분포양상은 방사성광물이 상대적으로 높게 함유되는 지질과의 관련성을 잘 반영하고 있다.

결 론

단양지역 지하수는 대부분 Ca-Na-HCO_3 가 우세한 유형의 특성을 보인다. 우라늄의 함량은 $0.02\sim 251.0\ \mu\text{g/L}$ 범위이며, 평균 $3.85\ \mu\text{g/L}$, $10\ \mu\text{g/L}$ 이상인 곳은 3개소 (3%)이고 미국의 음용기준치(MCL)를 초과한 지하수는 1개소에 불과하다. 백악기 화강암과 선캄브리아기 변성암 지역의 지하수에서 우라늄 함량이 상대적으로 높게 나타나며, 퇴적암류에서는 낮다.

전체 지하수에서 라돈 함량은 15%가 미국의 음용제한치(AMCL)인 $4,000\ \text{pCi/L}$ 을 초과한다. 백악기 화강암류에서 가장 높고, 퇴적암 지하수에서 상당히 낮다. 라돈은 백악기 화강암 지하수 중에서 77%, 선캄브리아기 변성암 지하수의 41.7%가 미국의 AMCL를 초과한다. 우라늄 농도와 pH, 심도, Eh는 백악기 화강암 지역에서 비교적 약한 선형적 비례관계를 보이나 통계적으로 의미있는 상관성은 보여주지 않는다.

요인분석 결과에 의하면, 우라늄과 라돈간의 상관계수는 0.15를 보여 이들의 거동특성은 서로 관련성이 거의 없다. 그 외에 이들은 여타 수질성분과도 무관한 거동특성을 나타낸다. 다만 라돈은 SiO_2 와는 0.68, HCO_3 와는 -0.48의 상관계수를 나타낼 뿐, 나머지 성분들과는 거의 무관한 거동특성을 보인다. 우라늄과 라돈은 특별한 요인에 의하여 영향을 크게 받지 않으며 비교적 독립적인 거동특성을 보인다.

본 연구에서 작성한 자연방사성물질의 정밀함량분포도는 향후 전국적인 자연방사성물질의 분포와 지질특성에 관한 데이터베이스 구축에 유용하게 활용될 예정이다.

사 사

이 논문은 국립환경과학원의 수탁연구과제인 ‘지질별 지하수 중 자연방사성물질 정밀조사 연구(2013)’의 일환으로 이루어졌습니다.

References

Asikainen, M. and Kahlos, H., 1979, Anomalously high concentration of uranium, radium and radon in water from drilled wells in the Helsinki region, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43, 1681-1686.
Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A. K., Krog, J. R., and Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, *Science of the Total environment*, 222, 71-91.

Betcher, R. N., 1987, Uranium in groundwater of south-eastern Manitoba, Canada. *Canadian J. Earth Science*, 25, 2089-2103.
Burns, P. C. and Finch, R., 1999, Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment. *Reviews in Mineralogy*, vol. 38, Miner. Soc. America, Washington, 679p.
Cho, B. W., Choo, C. O., Kim, M. S., Lee, Y. J., Yun, U., and Lee, B. D., 2011, Uranium and radon concentrations in groundwater near the Icheon Granite, *The Journal of Engineering Geology*, 21, 259-269. (In Korean with English abstract)
Cho, B. W., Sung, I. H., Cho, S. Y., and Park, S. K., 2007, A preliminary investigation of radon concentrations in groundwater of South Korea, *Journal of Soil and Groundwater Env.*, 15, 98-104. (In Korean with English abstract)
Cho, B. W., Yun, U., and Choo, C. O., 2010, Uranium and radon concentration in groundwater of the Taejeon area, Korea, 38th International Association of Hydrogeologists Conference, 61-62.
Cho, B. W., Kim, M. S., Kim, T. S., Han, J. S., Yun, U., Lee, B. D., Hang, J. H., and Choo, C. O., 2012, Hydrochemistry and distribution of uranium and radon in groundwater of the Nonsan area. *The Journal of Engineering Geology*, 22, 427-437.
Choo, C. O., 2002, Characteristics of uraniferous minerals in Daebo granite and significance of mineral species, *Journal of Mineral Soc. Korea*, 15, 11-21. (In Korean with English abstract)
Cothern, C. R. and Rebers, P. A., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, Lewis publishers, 283p.
EPA, 2012, Report to Congress: Radon in Drinking Water Regulations, EPA-815-R-12-002, 34p.
Frengstad, B., Midtgard, A. K., Banks, D., Krog, R. K., and Siewers, U., 2000, The chemistry of Norwegian groundwater. The distribution of trace elements in 476 crystalline bedrock groundwaters, as analyzed by ICP-MS techniques, *Science of the Total environment*, 246, 21-40.
Geological Survey of Korea, 1967, The Geological Map of Danyang, Sheet 6824-1. 60p.
Health Canada, 2009, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document-Radiological Parameters, 46p.
Langmuire, D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 547-569.
Langmuir, D., 1997, *Aqueous Environmental Geochemistry*, Prentice Hall, 600p.
Lee, J. U., Chon, H. T., and John, Y. W., 1997, Geochemical characteristics of groundwater in Korea with different aquifer geology and temperature-comparative study with granitic groundwater, *Journal of Soil and Groundwater Env.*, 4, 212-222.
Lowry, J. D., Hoxie, D. C., and Moreau, E., 1987, Extreme levels of ^{222}Rn and U in a private water supply, *Proceedings of the NWWA conference*, 363-375.

- Murphy, W. M. and Schock, 1999, R(eds.), Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment. Reviews in Mineralogy, vol. 38, Miner. Soc. America, 221-253.
- NIER, 2000, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (2). NIER Report. 323p.
- NIER, 2002, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (V), NIER Report, 357p.
- NIER, 2006, Study on the radionuclide concentration in the groundwater, NIER Report, 200p.
- NIER, 2009, A detailed study of the radionuclide concentration in the groundwater (II), NIER Report, 273p.
- STUK, 2005, 238U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses, STUK-A123, 94p.
- Wathen, J. B., 1987, The effect of uranium sitting in two-mica granites on uranium concentrations and radon activity in groundwater, Proceedings of the NWWA conference, 31-45p.
- WHO, 2003, Quantifying public health risk in the WHO guidelines for drinking-water quality, 49p.
- WHO, 2011, Guidelines for Drinking-water Quality, 4th Edition, 510p.

원고접수일: 2013년 12월 6일

수정본채택: 2013년 12월 19일

게재확정일: 2013년 12월 20일

조병욱

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3083
E-mail: cbw@kimgam.re.kr

윤 욱

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3118
E-mail: yunuk@kimgam.re.kr

이병대

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3088
E-mail: blee@kimgam.re.kr

황재홍

한국지질자원연구원 국토지질연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3058
E-mail: hwangjh@kigam.re.kr

김문수

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천광역시 서구 난지로 184
Tel: 032-560-7907
E-mail: hydro009@korea.kr

김태승

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천광역시 서구 난지로 184
Tel: 032-560-8360
E-mail: tskim99@korea.kr

추창오

경북대학교 지질학과
702-701 대구광역시 북구 산격동
Tel: 010-6656-3582
E-mail: chooco@knu.ac.kr